

УДК 621.454.3:535.233

## **Характеристики теплового излучения факела модельного ракетного двигателя на твердом топливе с учетом скоростной и температурной неравновесностей газа и частиц\***

**В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова**

*Вятский государственный университет, Киров*

E-mail: [ZagrayIA@yandex.ru](mailto:ZagrayIA@yandex.ru)

В работе рассмотрена методика исследования характеристик теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя на твердом топливе. Вычислительным экспериментом установлено влияние на спектральные и интегральные плотности потока энергии излучения и степени черноты скоростной и температурной неравновесностей газа и частиц. Значения величин неравновесностей определены при разных критических сечениях сопла и средних размерах частиц. Установлено, что скоростная неравновесность слабо сказывается в полосах излучения газовой фазы и сильнее проявляется в полосах прозрачности газовой фазы. Определяющей при расчетах характеристик излучения является температурная неравновесность, на фоне которой сильнее проявляется скоростное запаздывание частиц.

**Ключевые слова:** тепловое излучение, гетерогенные продукты сгорания, факел, модельный ракетный двигатель на твердом топливе, скоростная неравновесность, температурная неравновесность, характеристики излучения, степень черноты, вычислительный эксперимент.

### **Введение**

Определение спектральных и интегральных характеристик излучения факела ракетных двигателей представляет практический интерес при решении ряда проблем, к которым относятся селекция (обнаружение, распознавание) летательных аппаратов (ЛА), наведение зенитных управляемых ракет по тепловому излучению факела ЛА, защита ЛА ложными тепловыми целями, организация надежной радиосвязи, теплозащита элементов конструкции донной части ракетных двигателей с определением температуры вблизи среза сопла.

Исследованию двухфазных течений в соплах ракетных двигателей посвящено немало работ, например, [1–6] и др. Монография [4] содержит ряд теоретических и экспериментальных результатов по исследованию закономерностей двухфазных течений с учетом физических процессов, происходящих при взаимодействии частиц друг с другом и с газовым потоком, таких как деформация и вращение частиц, коагуляция, дробление и т.д. В работах [5, 6] с помощью метода математического моделирования изучалось течение

---

\* Работа выполнена в лаборатории теплофизических исследований ВятГУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-01145 а.

в соплах многокомпонентных сред с полидисперсной конденсированной фазой и возникающие при этом потери удельного импульса.

Исследованию теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания (ГПС) факелов ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) посвящены работы [7–9] и др. При расчетах и в экспериментальных исследованиях характеристик теплового излучения ГПС необходимо не только учитывать радиационные характеристики газовой и конденсированной фаз, но и принимать во внимание имеющиеся в потоках скоростную и температурную неравновесности [3, 6, 10–15].

Настоящая работа посвящена моделированию характеристик теплового излучения факела модельного РДТТ при наличии скоростной и температурной неравновесностей газа и частиц.

### 1. Особенности истечения двухфазных продуктов сгорания из сопла

Для повышения энергетических возможностей смесевых твердых топлив в их состав включают высокоэнергетические добавки полидисперсных порошков легких металлов, в основном алюминия. Таким образом, ГПС представляют собой многокомпонентную смесь газов с полидисперсной системой частиц оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). Система частиц  $Al_2O_3$  на срезе сопла и в факеле модельных РДТТ представлена гамма-распределением [16]

$$f(r) = \frac{a^{b+1}}{b!} r^b e^{-ar}, \quad (1)$$

в котором  $r$  — радиус частиц, параметры  $a$  и  $b$  определяются по результатам экспериментов.

На рис. 1 представлены графики функции  $f(r)$  с соответствующими параметрами  $a$ ,  $b$  и среднемассовыми радиусами частиц  $r_{43}$ , определяемыми по формуле

$$r_{43} = \frac{\int_0^{\infty} r^4 f(r) dr}{\int_0^{\infty} r^3 f(r) dr}.$$

Истечение ГПС из сопла сопровождается отставанием частиц от газа. Величина отставания или скоростной неравновесности между газом и частицами  $\Delta v = v_g - v_c$  зависит

в основном от размеров частиц конденсированной фазы (КФ), геометрии и размеров сопла [2, 10, 11, 14, 16] (рис. 2). Следствием этой неравновесности являются сложные процессы агломерации, дробления и сепарации частиц. Мелкие быстро летящие частицы сталкиваются и агломерируют с медленно летящими крупными частицами, а укрупненные

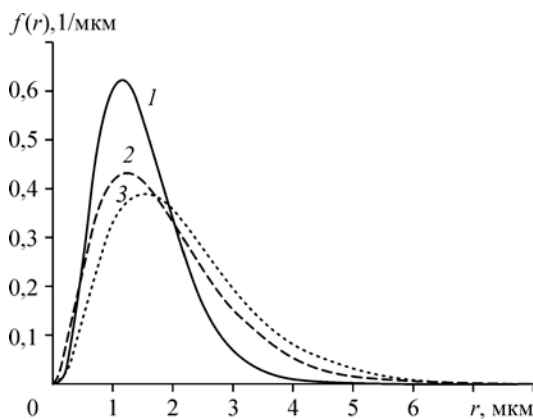


Рис. 1. Функции распределения частиц по размерам  $f(r)$  для факела РДТТ.  
 $a = 3$  (1), 1,6 (2), 1,6 (3)  $\text{мкм}^{-1}$ ,  $b = 3,5$  (1), 2 (2), 2,5 (3),  
 $r_{43} = 2,5$  (1), 3,75 (2), 4,06 (3) мкм.

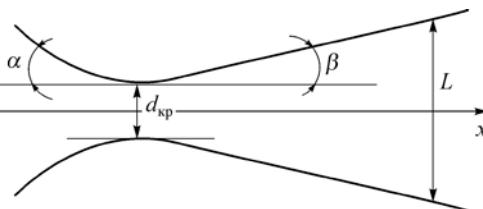


Рис. 2. Профиль сопла модельного РДТТ.

агломераты дробятся газодинамическим напором газовой фазы (ГФ). При этом крупные частицы осаждаются (сепарируют) на стенки сопла и жидкая пленка оксидов течет вдоль стенок, что подтверждается экспериментальной регистрацией.

Температурная неравновесность  $\Delta T = T_{\text{ч}} - T_{\text{г}}$  при расширении ГПС в сопле обусловлена более медленным охлаждением частиц по сравнению с ГФ. В общем случае более высокая температура частиц может быть вызвана догоранием крупных частиц, кристаллизацией частиц КФ с сохранением температуры фазового перехода [2, 10, 12, 14, 16]. Эти процессы выходят за рамки представленной работы, рассматриваются только окончательные значения  $\Delta v$  и  $\Delta T$ , обусловленные процессами, учтенными в исследованиях [2, 14]. Расчет реальных распределений  $\Delta v$  и  $\Delta T$  по оси и по радиусу струи представляет собой сложную газодинамическую задачу. Поскольку пирометр, воспринимающий тепловое излучение, регистрирует усредненное излучение по линии визирования, то можно заменить мгновенные распределения  $\Delta v$  и  $\Delta T$  средними значениями и проанализировать их влияние на характеристики излучения.

Значения величин скоростной и температурной неравновесностей между газом и частицами напрямую зависят от размеров частиц (или радиусов  $r_{43}$ ) и геометрии сопла: диаметра критического сечения  $d_{\text{кр}}$ , полууглов раствора суживающейся и расширяющейся частей сопла ( $\alpha$  и  $\beta$  соответственно) и длины сопла [2, 10, 14] (рис. 2).

В настоящей работе исследуются модельные двигатели с разными размерами сопла определенной конфигурации. В качестве примера рассмотрена конфигурация сопла при  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$  для разных критических сечений. Полученные при этом значения величин температурной и скоростной неравновесности между газом и частицами с радиусами  $r_{43}$  (см. рис. 1) взяты из газодинамических расчетов [2, 14] и представлены в таблице.

## 2. Методика расчета теплового излучения факела

Тепловое излучение ГПС факела вблизи среза сопла складывается из излучения компонент ГФ и КФ. Поэтому расчет характеристик теплового излучения факела модельного РДТТ должен проводиться с учетом скоростной и температурной неравновесности между частицами КФ и ГФ, процесса догорания частиц за срезом сопла, процесса кристаллизации расплавленных частиц, рассеяния излучения, идущего из камеры сгорания со стороны среза сопла, на частицах КФ. Расчет теплового излучения ГПС представляет непростую задачу даже в случае теплового и динамического равновесия между газовой и конденсированной фазами. Сложность вычислений усугубляется тем, что частицы конденсированной фазы представляют собой полидисперсную систему, описываемую функцией  $f(r)$  (1).

Для ГПС модельного РДТТ рассматривалось интегро-дифференциальное уравнение переноса энергии излучения

$$(\Omega \nabla) I_{\lambda}(r, \Omega) + \kappa_{\lambda} I_{\lambda}(r, \Omega) = \beta_{\lambda} \int_{4\pi} I_{\lambda}(r', \Omega') \gamma_{\lambda}(r, r', \Omega \Omega') d\omega' + \alpha_{\lambda} I_{\lambda \text{ЛЧТ}}(r), \quad (2)$$

Таблица  
Величины скоростной и температурной неравновесностей

Параметры	Значения								
	30,5			12,7			6,35		
$d_{\text{кр}}$ , мм									
$r_{43}$ , мкм	2,5	3,75	4,06	2,5	3,75	4,06	2,5	3,75	4,06
$v_{\text{ч}}$ , м/с	1890	1710	1690	1650	1350	1300	1370	1150	1100
$v_{\text{г}} - v_{\text{ч}}$ , м/с	610	790	810	850	1150	1200	1130	1350	1400
$v_{\text{г}}/v_{\text{ч}}$	1,32	1,46	1,48	1,52	1,85	1,92	1,82	2,17	2,27
$T_{\text{ч}}$ , К	2450	2660	2700	2730	2940	2980	2950	3120	3130
$T_{\text{ч}} - T_{\text{г}}$ , К	450	660	700	730	940	980	950	1120	1130

здесь  $\Omega'$  — направление луча, из которого рассеянное излучение переходит в рассматриваемое  $\Omega$ ,  $\hat{\Omega\Omega'}$  — угол между направлениями,  $I_\lambda$  — спектральная интенсивность энергии излучения,  $r$  — координата,  $\omega$  — телесный угол,  $I_{\lambda\text{АЧТ}}$  — спектральная интенсивность энергии излучения абсолютно черного тела (АЧТ),  $\kappa_\lambda$  — спектральный коэффициент ослабления, равный сумме спектральных коэффициентов рассеяния  $\beta_\lambda$  и поглощения  $\alpha_\lambda$ ,  $\gamma_\lambda$  — индикатриса рассеяния. Спектральный коэффициент поглощения  $\alpha_\lambda$  ГПС представлялся суммой коэффициентов поглощения КФ ( $\alpha_{z\lambda}$ ) и ГФ ( $\alpha_{r\lambda}$ ):  $\alpha_\lambda = \alpha_{z\lambda} + \alpha_{r\lambda}$ .

В качестве основных компонентов ГФ ГПС рассматривались молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$ . Излучение молекул ГФ рассчитывалось с использованием информационной системы Spectra [17], включающей банки данных HITRAN [18], HITEMP [19] и др. Необходимые для решения уравнения (2) радиационные характеристики частиц конденсата  $\kappa_\lambda$ ,  $\beta_\lambda$  и  $\alpha_\lambda$  определялись по методикам работ [16, 20] в приближении теории Ми. Индикатриса рассеяния  $\gamma_\lambda$  представлялась разложением в ряд по полиномам Лежандра [21]. Число частиц  $N$  в единице объема ГПС определялось как

$$N = z\rho_r v_r \left/ \left( 4/3 \cdot \pi \int_0^\infty r^3 f(r) dr \cdot (1-z)\rho_c v_c \right) \right.,$$

где  $z$  — массовая доля частиц конденсата,  $\rho_r$  и  $\rho_c$  — плотности газа и материала частиц конденсата,  $v_r$  и  $v_c$  — скорости газа и частиц. Решение уравнения переноса энергии излучения (2) осуществлялось в  $P_3$ -приближении метода сферических гармоник с применением матричной факторизации для одномерной цилиндрической геометрии со свободной границей. Спектральные и интегральные плотности потоков ( $F_\lambda$  и  $F$ ) через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению нормали, определялись следующим образом:

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda(r, \Omega) \Omega n d\Omega, \quad F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda,$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — нижняя и верхняя границы спектрального интервала. Спектральные и интегральные степени черноты ( $\varepsilon_\lambda$  и  $\varepsilon$ ) имели вид

$$\varepsilon_\lambda = F_\lambda / F_{\lambda\text{АЧТ}}, \quad \varepsilon = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda \left/ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda\text{АЧТ}} d\lambda \right..$$

Описание комплексной методики по расчету радиационных характеристик и характеристик излучения (спектральных и интегральных плотностей потоков и степеней черноты) приведено в работах [22, 23]. Также в работах [22, 24] была проверена работоспособность методики расчета путем сравнения с расчетными и экспериментальными данными других авторов по характеристикам излучения для гомогенных и ГПС факелов модельных ракетных двигателей.

### 3. Исходные данные

В качестве исходных данных для определения характеристик излучения использовались основные термодинамические параметры, рассчитанные по методике работы [10]: давление  $p = 10^5$  Па, температура газовой фазы  $T_r = 2000$  К, скорость течения газа  $v_r = 2500$  м/с, молярная масса продуктов сгорания  $\mu = 0,026$  кг/моль, массовые доли конденсата  $z = 0,2$  и массовые доли газовой фазы имели следующие значения:  $\text{H}_2\text{O} = 0,330$ ,  $\text{CO} = 0,163$ ,  $\text{CO}_2 = 0,101$ ,  $\text{N}_2 = 0,166$ ,  $\text{H}_2 = 0,026$ ,  $\text{O}_2 = 0,014$ . Частицы конденсата предполагались сферическими с функцией распределения  $f(r)$  (1).

В расчетах использовались минимальные и максимальные значения величин температурной и скоростной неравновесностей между газом и частицами, соответствующие  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $d_{кр} = 30,5$  мм при  $r_{43} = 2,5$  мкм и  $r_{43} = 4,06$  мкм (см. таблицу). Выбранные для расчетов толщины излучающей струи  $L = 20$  мм и  $L = 100$  мм отвечали начальному участку факела вблизи среза сопла модельного РДТТ с диаметрами критического сечения  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $d_{кр} = 30,5$  мм соответственно. Расстояние от критического сечения сопла до выбранной точки на оси факела определялось по формуле  $x = (L - d_{кр})/2\text{tg}\beta$  (рис. 2). Расстояние от  $d_{кр} = 6,35$  мм до сечения струи с диаметром  $L = 20$  мм составило  $x = 25,47$  мм или  $x/d_{кр} = 4,01$  (в калибрах диаметра критического сечения), расстояние от  $d_{кр} = 30,5$  мм до сечения струи с диаметром  $L = 100$  мм —  $x = 129,7$  мм или  $x/d_{кр} = 4,25$ .

#### 4. Результаты расчетов

Расчеты характеристик излучения (спектральных и интегральных плотностей потоков и степеней черноты) для условий факела вблизи среза сопла модельного РДТТ приведены с учетом и без учета неравновесностей и представлены на рис. 3–6. На рис. 7 показано влияние неравновесностей на спектральную плотность потока в виде отношения  $F_{\lambda}^*/F_{\lambda}$ , где  $F_{\lambda}^*$  — спектральная плотность потока при наличии неравновесностей (скоростной, температурной или обеих сразу),  $F_{\lambda}$  — спектральная плотность потока при равновесном течении.

Различие в скоростях между газом и частицами в первую очередь сказывается на количестве частиц в единице объема. С увеличением скорости газа и уменьшением скорости частиц возникает задержка этих частиц в данном месте тракта истечения продуктов сгорания, вызывающая увеличение числа частиц конденсата в единице объема. Это приводит к пропорциональному увеличению коэффициентов  $\kappa_{\lambda}$ ,  $\beta_{\lambda}$ ,  $\alpha_{\lambda}$  и, как следствие, к росту характеристик теплового излучения.

Скоростное отставание частиц от газа  $v_r - v_c$  на срезе сопла для указанных ранее средних размеров частиц может достигать от 610 до 810 м/с при  $d_{кр} = 30,5$  мм и от 1130 до 1400 м/с при  $d_{кр} = 6,35$  мм. При этом увеличение интегральной плотности потока  $F$  составляет от 15 до 25 % при  $d_{кр} = 30,5$  мм (рис. 3а и 4а, кривые 1 и 2) и от 26 до 51 % при  $d_{кр} = 6,35$  мм (рис. 5а и 6а, кривые 1 и 2) в отличие от равновесного течения газа и частиц ( $T_r = T_c = 2000$  К,  $v_r/v_c = 1$ ). Значения  $F_{\lambda}^*/F_{\lambda}$  в окнах прозрачности ГФ получаются

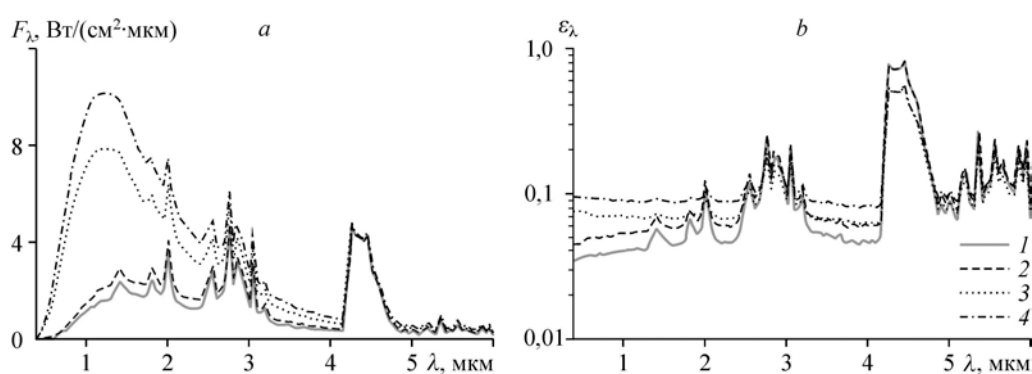


Рис. 3. Характеристики излучения  $F_{\lambda}$  и  $\varepsilon_{\lambda}$  при  $d_{кр} = 30,5$  мм и  $r_{43} = 2,5$  мкм.

Расчеты при  $T_r = T_c = 2000$  К и  $v_r/v_c = 1$  (1),  $v_r/v_c = 1,32$  (2); расчеты при  $T_r = 2000$  К,  $T_c = 2450$  К и  $v_r/v_c = 1$  (3),  $v_r/v_c = 1,32$  (4);  $N = 407$  (1), 537 (2), 428 (3), 565 (4) мм<sup>-3</sup>,  
 $F = 7,453$  (1), 8,543 (2), 16,78 (3), 20,63 (4) Вт/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,08538$  (1), 0,09786 (2), 0,08923 (3), 0,1033 (4).

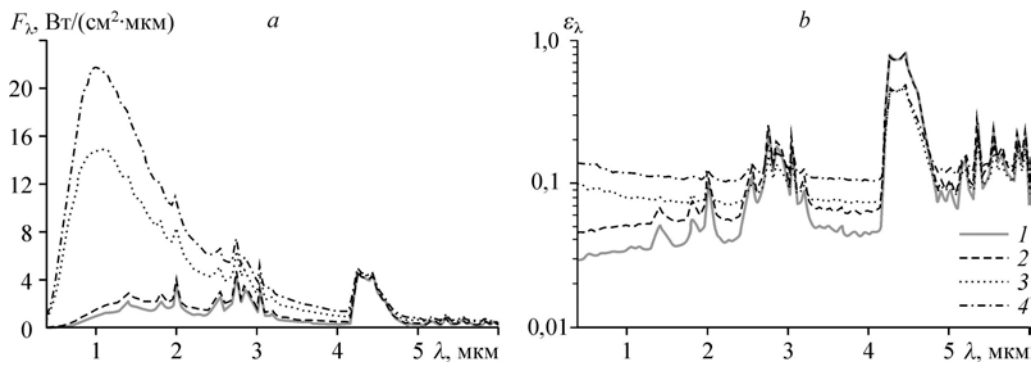


Рис. 4. Характеристики излучения  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  при  $d_{кр} = 30,5$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм.  
 Расчеты при  $T_r = T_q = 2000$  К и  $v_r/v_q = 1$  (1),  $v_r/v_q = 1,48$  (2); расчеты при  $T_r = 2000$  К,  $T_q = 2700$  К  
 и  $v_r/v_q = 1$  (3),  $v_r/v_q = 1,48$  (4);  $N = 117$  (1), 173 (2), 136 (3), 202 (4) мм<sup>-3</sup>,  
 $F = 7,004$  (1), 8,439 (2), 26,27 (3), 36,25 (4) Вт/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,08023$  (1), 0,09667 (2), 0,08877 (3), 0,1225 (4).

примерно равны отношению  $v_r/v_q$  при наличии скоростной неравновесности в потоке (рис. 7, кривая 1). Увеличение интегральной степени черноты  $\varepsilon$  при скоростном запаздывании составляет от 15 до 20 % при  $d_{кр} = 30,5$  мм (рис. 3b и 4b, кривые 1 и 2) и от 34 до 51 % при  $d_{кр} = 6,35$  мм (рис. 5b и 6b, кривые 1 и 2). Наибольшее влияние скоростной неравновесности соответствует максимальному  $r_{43} = 4,06$  мкм при заданном  $d_{кр}$ .

Для полос излучения газовой фазы 1,9, 2,7 и 4,3 мкм скоростное запаздывание меньше сказывается на спектральных характеристиках излучения  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$ . Чем больше коэффициент поглощения газа  $\alpha_{r\lambda}$  (4,3–5,1 мкм), тем слабее влияние. Это объясняется тем, что увеличение числа слабоизлучающих частиц в единице объема в указанном спектральном интервале приводит к экранированию излучения газовой фазы. Наоборот, в полосах прозрачности газовой фазы усиливается влияние скоростной неравновесности на  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$ .

Температурная неравновесность частиц конденсата и газовой фазы усиливает роль излучения частиц в окнах прозрачности газовой фазы. Разница между температурами частиц и газа  $T_q - T_r$  на срезе сопла для рассматриваемых средних размеров частиц может достигать значений от 450 до 700 К при  $d_{кр} = 30,5$  мм и от 950 до 1130 К при  $d_{кр} = 6,35$  мм.

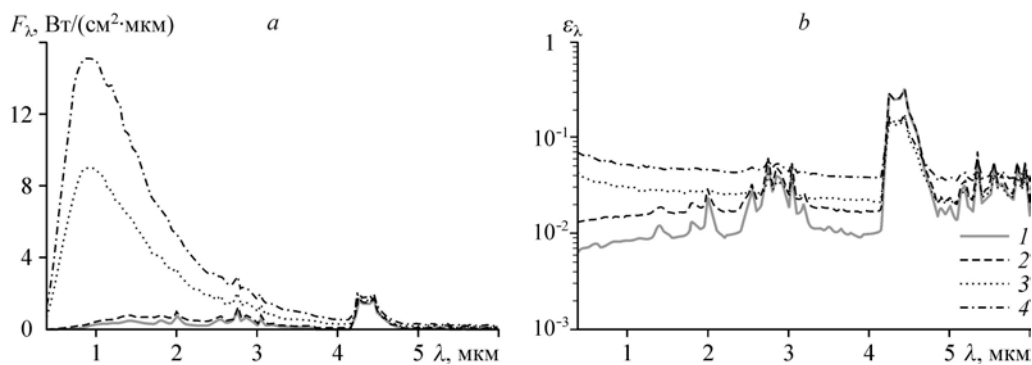


Рис. 5. Характеристики излучения  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  при  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $r_{43} = 2,5$  мкм.  
 Расчеты при  $T_r = T_q = 2000$  К и  $v_r/v_q = 1$  (1),  $v_r/v_q = 1,82$  (2), расчеты при  $T_r = 2000$  К,  $T_q = 2950$  К  
 и  $v_r/v_q = 1$  (3),  $v_r/v_q = 1,82$  (4);  $N = 407$  (1), 741 (2); 532 (3), 969 (4) мм<sup>-3</sup>,  
 $F = 1,827$  (1), 2,296 (2), 13,07 (3), 21,82 (4) Вт/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,02092$  (1), 0,02799 (2), 0,03092 (3), 0,05162 (4).

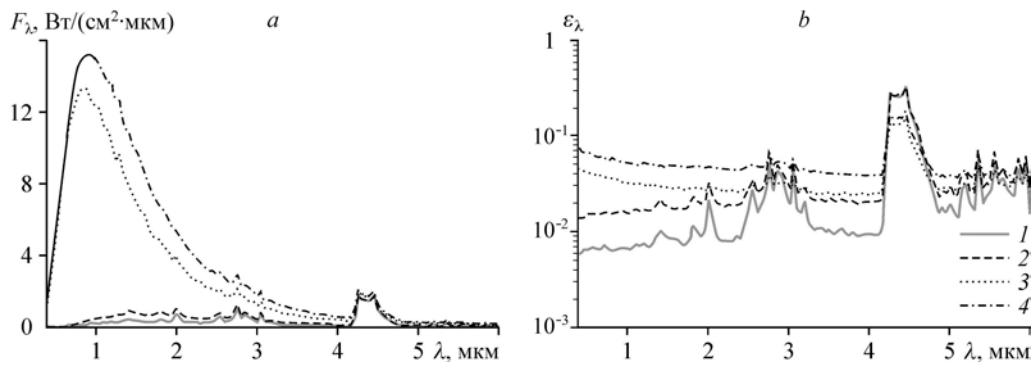


Рис. 6. Характеристики излучения  $F_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$  при  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм.

Расчеты при  $T_r = T_q = 2000$  К и  $v_r/v_q = 1$  (1),  $v_r/v_q = 2,27$  (2); расчеты при  $T_r = 2000$  К,  $T_q = 2950$  К и  $v_r/v_q = 1$  (3),  $v_r/v_q = 2,27$  (4);  $N = 117$  (1), 265 (2), 168 (3), 381 (4) мм<sup>-3</sup>,  $F = 1,711$  (1), 2,58 (2), 17,45 (3), 35,4 (4) Вт/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,0196$  (1), 0,02956 (2), 0,03254 (3), 0,06601 (4).

При этом интегральная плотность потока  $F$  увеличивается в 2,25–3,75 раза при  $d_{кр} = 30,5$  мм (рис. 3а и 4а, кривые 1 и 3) и в 7,15–10,2 раза при  $d_{кр} = 6,35$  мм (рис. 5а и 6а, кривые 1 и 3) в отличие от равновесного течения газа и частиц ( $T_r = T_q = 2000$  К,  $v_r/v_q = 1$ ). Отношение  $F_\lambda^*/F_\lambda$  при наличии температурной неравновесности изменяется в широких пределах и достигает максимума в коротковолновой области спектра на границе рассматриваемого спектрального интервала при  $\lambda = 0,4$  мкм (рис. 7, кривая 2). При этом значение  $F_\lambda^*/F_\lambda$  тем больше, чем больше температура частиц и их размеры. Как видно из рисунка, наибольшее значение  $F_\lambda^*/F_\lambda \approx 4000$  ( $\lambda = 0,4$  мкм) достигается при  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм. Возрастающая температура частиц приводит к тому, что максимум излучения продуктов сгорания сдвигается в область коротких длин волн на основании закона смещения Вина. В полосах излучения газовой фазы 1,9, 2,7 и 4,3 мкм при возрастании температуры частиц коэффициент  $F_\lambda^*/F_\lambda < 10$ . Увеличение интегральной степени черноты  $\varepsilon$  при температурной неравновесности составляет от 5 до 11 % при  $d_{кр} = 30,5$  мм (рис. 3б и 4б, кривые 1 и 3) и от 47 до 66 % при  $d_{кр} = 6,35$  мм (рис. 5б и 6б, кривые 1 и 3). Наибольшее влияние температурной неравновесности соответствует максимальному  $r_{43} = 4,06$  мкм при заданном  $d_{кр}$ .

Совместный учет скоростной и температурной неравновесностей сказывается как на спектральных, так и на интегральных характеристиках излучения (рис. 3–6, кривая 4). Влияние температурной неравновесности более выражено, чем влияние скоростной в сравнении с равновесным течением. Изменение количества «холодных» частиц  $N$  в единице объема ГПС слабо сказывается на величинах  $F_\lambda$  и  $F$ . Такое же количество частиц  $N$ , но имеющих более высокую температуру, оказывает большое влияние на  $F_\lambda$  и  $F$ . То есть влияние на характеристики излучения скоростного отставания частиц от газа на фоне температурной неравновесности усиливается (рис. 7, кривая 3).

Отношение  $F_\lambda^*/F_\lambda$  при наличии температурной и скоростной неравновесностей повторяет характер  $F_\lambda^*/F_\lambda$ , имеющий место при наличии только температурной неравновесности, но с большими значениями, что объясняется совместным влиянием описанных ранее факторов.

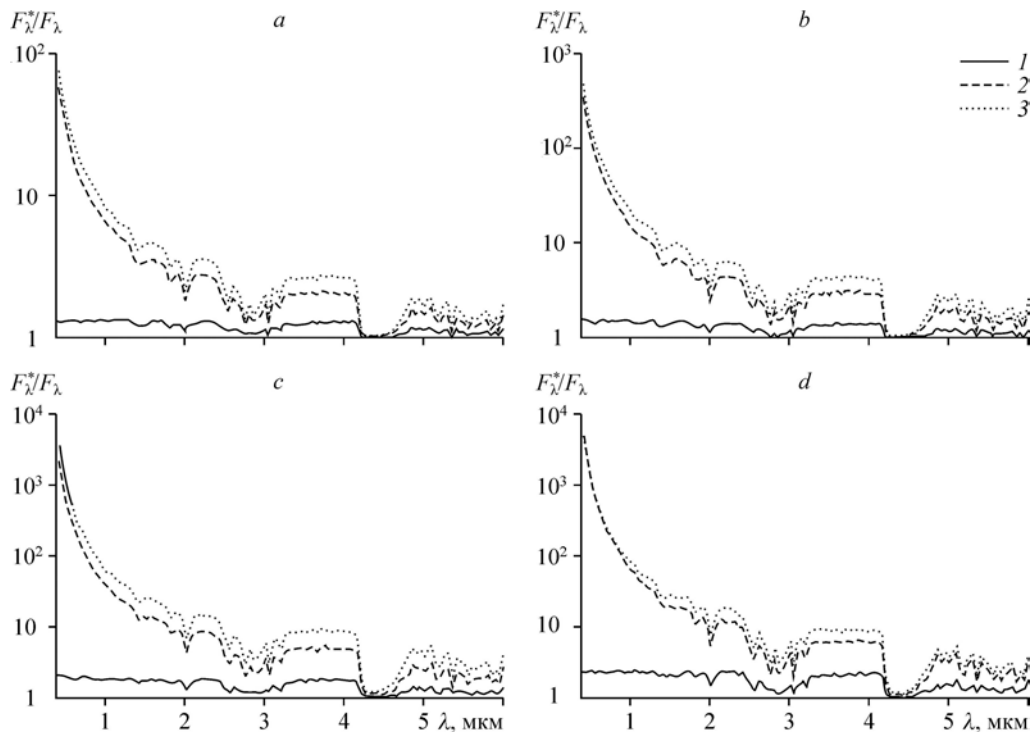


Рис. 7. Влияние неравносностей на спектральную плотность потока.

$a$  —  $d_{кр} = 30,5$  мм и  $r_{43} = 2,5$  мкм,  $b$  —  $d_{кр} = 30,5$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм,  
 $c$  —  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $r_{43} = 2,5$  мкм,  $d$  —  $d_{кр} = 6,35$  мм и  $r_{43} = 4,06$  мкм;

1 — отношение плотности потока  $F_{\lambda}^*$  при наличии скоростной неравносности к плотности потока  $F_{\lambda}$  при равновесном течении, 2 — отношение плотности потока  $F_{\lambda}^*$  при наличии температурной неравносности к плотности потока  $F_{\lambda}$  при равновесном течении, 3 — отношение плотности потока  $F_{\lambda}^*$  при наличии скоростной и температурной неравносностей к плотности потока  $F_{\lambda}$  при равновесном течении.

При  $d_{кр} = 30,5$  мм  $F$  может увеличиваться в 2,77–5,18 раза в зависимости от  $r_{43}$  (рис. 3а и 4а, кривые 1 и 4). При  $d_{кр} = 6,35$  мм  $F$  может увеличиваться в 11,9–20,7 раза в зависимости от  $r_{43}$  (рис. 5а и 6а, кривые 1 и 4). Увеличение интегральной степени черноты  $\varepsilon$  при совместном учете неравносностей составляет от 21 до 53 % при  $d_{кр} = 30,5$  мм (рис. 3б и 4б, кривые 1 и 4) и от 147 до 237 % при  $d_{кр} = 6,35$  мм (рис. 5б и 6б, кривые 1 и 4).

### Выводы

В настоящей работе рассмотрено влияние температурной и скоростной неравносностей на спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения и степени черноты гетерогенных продуктов сгорания факела модельного РДТТ при разном критическом сечении сопла  $d_{кр}$  (6,35 и 30,5 мм) и  $f(r)$  со средним радиусом  $r_{43}$  (2,5 и 4,06 мкм).

Скоростная неравносность слабо сказывается в полосах излучения газовой фазы и сильнее проявляется в полосах ее прозрачности. Отношения спектральных плотностей потоков при наличии скоростного запаздывания и при равновесном течении ( $F_{\lambda}^*/F_{\lambda}$ ) в окнах прозрачности газовой фазы примерно равны отношению скорости газа к скорости частиц в потоке ( $v_r/v_{ch}$ ). Отношение  $F_{\lambda}^*/F_{\lambda}$  при наличии температурной неравносности



изменяется в широких пределах, достигает максимума в коротковолновой области спектра и увеличивается с ростом температуры и размеров частиц. В полосах излучения газовой фазы 1,9, 2,7 и 4,3 мкм при возрастании температуры частиц значения  $F_{\lambda}^*/F_{\lambda} < 10$ . Таким образом, при расчетах характеристик излучения определяющей является температурная неравновесность, на фоне которой сильнее проявляется скоростное запаздывание частиц.

Для рассмотренных в работе условий течения продуктов сгорания в факеле модельного РДТТ установлено совместное влияние температурной и скоростной неравновесностей на интегральные плотности потоков энергии излучения  $F$  и степени черноты  $\varepsilon$ . При этом максимальное отношение результатов расчета при совместном учете скоростной и температурной неравновесностей к результатам расчета равновесного течения составило до 20,7 раз для  $F$  и до 3,37 раз для  $\varepsilon$  (при  $d_{кр} = 6,35$  мм). Наибольшее влияние указанных неравновесностей проявляется в экспериментах с модельными двигателями, имеющими небольшие критические сечения и, соответственно, малые размеры струи.

### Список литературы

1. Крайко А.Н., Нигматуллин Р.И., Старков В.К., Стернин Л.Е. Механика многофазных сред // Итоги науки и техн. Гидромеханика. 1972. Т. 6. М.: Изд. ВИНТИ. С. 93–174.
2. Сарнер С. Химия ракетных топлив. М: Мир, 1969. 488 с.
3. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1994. 320 с.
4. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд. ТГУ, 1986. 262 с.
5. Каргашев А.Л., Каргашева М.А. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах: монография. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. 158 с.
6. Глазунов А.А., Дьяченко Н.Н., Дьяченко Л.И. Численное исследование течения ультрадисперсных частиц оксида алюминия в сопле ракетного двигателя твердого топлива // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 1. С. 81–88.
7. Нельсон Х.Ф. Оценка неопределенности расчета ИК-излучения факела ракеты // Аэрокосмическая техника. 1988. № 10. С. 161–168.
8. Домбровский Л.А. Расчетное исследование радиационного теплообмена при двухфазном течении в сверхзвуковом сопле // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, № 2. С. 261–268.
9. Тиранов А.Д., Филиппов В.Л. Расчет спектральной плотности силы излучения факелов ракетных двигателей на твердом топливе // Оптический журнал. 2012. Т. 79, № 3. С. 77–83.
10. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник. В 10 т. / Под ред. В.П. Глушко. М.: ВИНТИ, 1971. Т. 1. 266 с.
11. Карлсон Д.Д. Экспериментальное определение динамического запаздывания частиц при течении смеси газ частицы в сопле ракетного двигателя // Ракетная техника и космонавтика. 1965. № 2. С. 250–254.
12. Карлсон Д.Д. Экспериментальное определение теплового запаздывания при течении газа с твердыми частицами в сопле // Ракетная техника и космонавтика. 1962. № 7. С. 136–138.
13. Вафин Д.Б. Расчет излучения осесимметричных двухфазных сред с температурной неравновесностью фаз // Вестник КГТУ. 2009. № 1. С. 18–22.
14. Stonecypher T.E. Dynamic and thermal non-equilibrium in two phase flow in rocket nozzles // Report No. P-60-17. Rohmand Haas Company, Dec. 27, 1960.
15. Кузьмин В.А., Маратканова Е.И. Влияние тепловой и динамической неравновесностей на эмиссионные свойства гетерогенных продуктов сгорания // Промышленная теплотехника. 1988. Т. 10, № 1. С. 44–48.
16. Кузьмин В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. Киров: Полекс, 2004. 231 с.
17. Михайленко С.Н., Бабиков Ю.Л., Головкин В.Ф. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 9. С. 765–776.
18. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., et al. The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database // J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2017. No. 203. P. 3–69.
19. Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A., Perevalov V.I., Tashkun S.A., Tennyson J. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database // J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2010. No. 111. P. 2139–2150.

20. **Кузьмин В.А., Заграй И.А.** Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок. Германия: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 140 с.
21. **Кузьмин В.А., Пяткова И.А.** Радиационные характеристики частиц конденсированной фазы гетерогенных продуктов сгорания в энергетических установках // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 1, 2. С. 14–20.
22. **Кузьмин В.А., Маратканова Е.И., Заграй И.А., Рукавишников Р.В.** Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 385–400.
23. **Kuzmin V.A., Maratkanova E.I., Zagrai I.A.** Modeling of thermal radiation of heterogeneous combustion products in the model solid rocket engine plume // Procedia Engng. 2017. No. 206. P. 1801–1807.
24. **Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И., Шмакова Н.А.** Тепловое излучение факела модельного жидкостного ракетного двигателя // Advanced Sci. 2018. № 1. С. 34–37.

*Статья поступила в редакцию 18 июня 2018 г.,  
после переработки — 29 августа 2018 г.,  
принята к публикации 11 декабря 2018 г.*